

УДК 621.311

**Р. Д. Шимук,**  
**Д. С. Шимук,** канд. техн. наук  
 Харьковская национальная академия  
 городского хозяйства

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ОТКАЗОВ СНАББЕРНЫХ ЦЕПЕЙ**

**Введение.** Защита силовых вентиляей источников вторичного электропитания (ИВП) от мощных импульсных коммутационных перегрузок реализуется посредством цепей коррекции динамической траектории переключения вентиляей - снабберов. Снаббер представляет собой установленную параллельно вентиллю R-C или VD-R-C-цепь. Дефекты снабберов (обрывы элементов, снижение емкости конденсаторов) не приводят к немедленной потере работоспособности вентиляей, но лишают вентиль такой защиты, чем форсируют его последующий внезапный отказ. Параллельное подключение снабберов силовым вентилям служит причиной инвариантности параметров входной и выходной электроэнергии ИВП к дефектам снабберных цепей. Знание содержания и условий проявления диагностических признаков технического состояния (ТС) снабберов позволит своевременно обнаружить, локализовать и устранить отказ снаббера при техническом обслуживании ИВП, предупредив тем самым внезапные отказы силовых вентиляей и ИВП в целом.

Цель доклада: обоснование математической модели силовой части вентильного преобразователя, позволяющей определить содержание и условия проявления диагностических признаков ТС снабберных цепей.

**Изложение основного материала.** В [1 - 3] обоснована необходимость применения и механизм работы, в [4] приводятся сведения о новой схемотехнике и элементной базе для снабберов. В [5, 6] проанализировано влияние ТС снабберов на условия работы силовых вентиляей и сделан вывод о необходимости повышения глубины контроля силовых цепей до уровня снабберных цепей. Но практические рекомендации в [4, 7] по обслуживанию и ремонту современных ИВП не предусматривают контроль ТС снабберов. При моделировании рабочих процессов в силовых частях ИВП динамика снабберов не учитывается [1, 3]. Для определения содержания и условий проявления диагностических признаков снабберов, согласно [1, 8], необходимо изучение поведения силовой части ИВП при различных ТС снабберов и различных входных воздействиях. Результатом такого изучения [8] является математическая модель (ММ) объекта для различных ТС снабберных цепей при любых возможных входных воздействиях.

Силовая часть (СЧ) вентильного ИВП представляет собой нелинейный динамический объект, выполняющий преобразование спектрального состава входной электрической энергии. Содержание такого преобразования определяется схемой силовой части ИВП, параметрами ее элементов, алгоритмом переключения силовых вентиляей. Поэтому содержание диагностических признаков для определения ТС таких объектов следует искать в виде различий в спектральном составе откликов исправного и неисправного объекта на определенное входное воздействие.

Спектральный состав отклика определяется мгновенным значением отклика. Поэтому в основу ММ положена кусочно-линейная аппроксимация нелинейных характеристик клапанов, которая обеспечивает наибольшую точность при определении мгновенных процессов в СЧ ИВП.

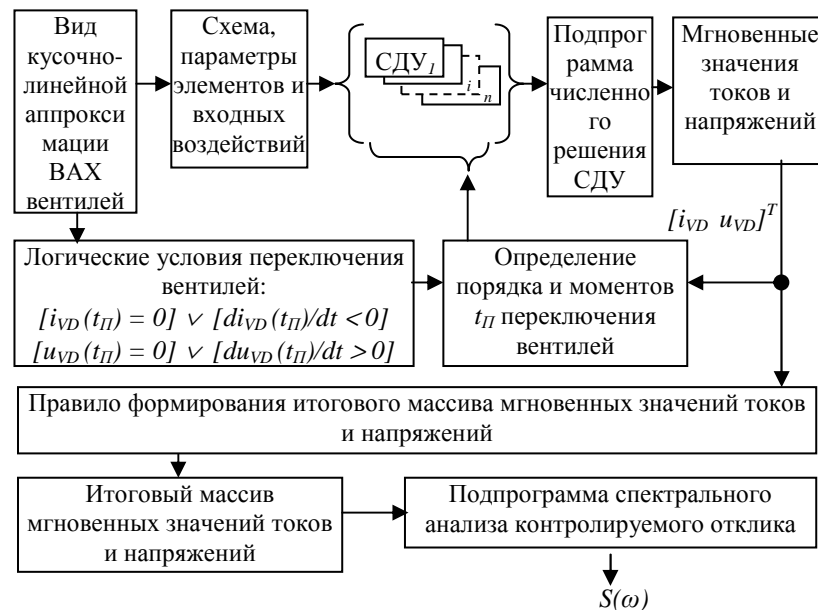


Рис.1 – Структура математической модели силовой части источника вторичного электропитания

Поскольку невозможно априорно определить состояния и порядок изменения проводимости клапанов, то предлагается следующая структура ММ (рис. 1). Исходные данные: схема СЧ, параметры ее элементов; законы изменения во времени входных воздействий; вид аппроксимации нелинейных характеристик клапанов. Далее определяется начальная комбинация линейных участков характеристик клапанов, для которой составляется линейная система дифференциальных уравнений (СДУ<sub>1</sub>) состояния. Решение СДУ получаем в результате ее численного интегрирования при известных начальных условиях. В ходе решения контролируем текущие значения токов и напряжений всех клапанов  $[i_{VD} \ u_{VD}]^T$  на предмет соответствия логическим условиям коммутации клапанов: выполнение этих условий определяет момент  $t_{П}$  переключения какого-либо клапана на иной линейный участок. Каждое  $i$ -е состояние проводимости клапанов описывается своей системой СДУ <sub>$i$</sub>  на временном интервале продолжительностью  $\Delta t_i$ . Последовательно переходя от одной комбинации линейных участков характеристик клапанов к другой и накапливая массив мгновенных значений токов и напряжений элементов, получаем массив мгновенных значений токов и напряжений для конкретного набора параметров элементов СЧ и входных воздействий. Спектральные характеристики отклика схемы получим на основе стандартных методов спектрального анализа.

В качестве примера рассмотрим получение явной ММ однофазного мостового выпрямителя с L-фильтром и снабберными RC-цепями (рис. 2). Цель моделирования - установить влияние изменения параметров RC-цепей на мгновенные процессы в схеме; определить условия для проявления диагностических признаков проявления изменений параметров снабберных RC-

цепей на выходе схемы. Стрелками на рис. 2 отмечены положительные направления протекания тока в ветвях.

Предварительными исследованиями [9] установлено, что факторами, маскирующими проявление диагностических признаков снабберов через выходное напряжение, служат: подключенная параллельно нагрузке  $R_H$  емкость выходного фильтра; низкоомная нагрузка  $R_H$ .

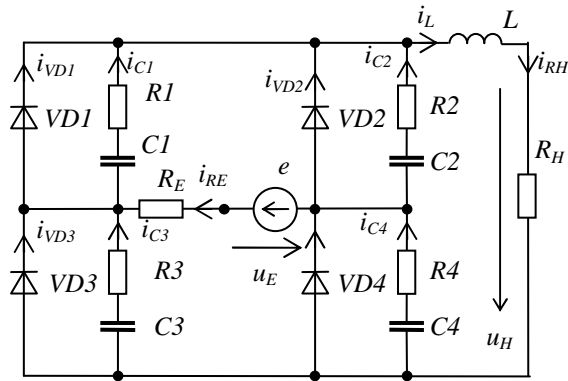


Рис. 2 – Силовая часть источника вторичного электропитания

Поэтому силовая часть ИВП на рис. 2 не содержит выходной емкости, а величина сопротивления  $R_H$  принята равной 1 МОм, что соответствует входному сопротивлению большинства измерительных приборов.

В исправной схеме элементы снабберов имеют соответственно одинаковые номиналы ( $C1 = C2 = C3 = C$ ,  $R1 = R2 = R3 = R$ ). Реальную ВАХ вентиля аппроксимируем  $R$ - $S$  кусочно-линейной характеристикой (с нулевым сопротивлением в прямом направлении и высокоомным сопротивлением  $R_{VD}$  в

закрытом состоянии).

Логические условия для определения момента переключения вентиля показаны на рис. 1: открытый клапан запирается в момент перехода его тока  $i_{VD}$  в отрицательную полуплоскость, а закрытый клапан открывается в момент перехода его напряжения  $u_{VD}$  в положительную полуплоскость.

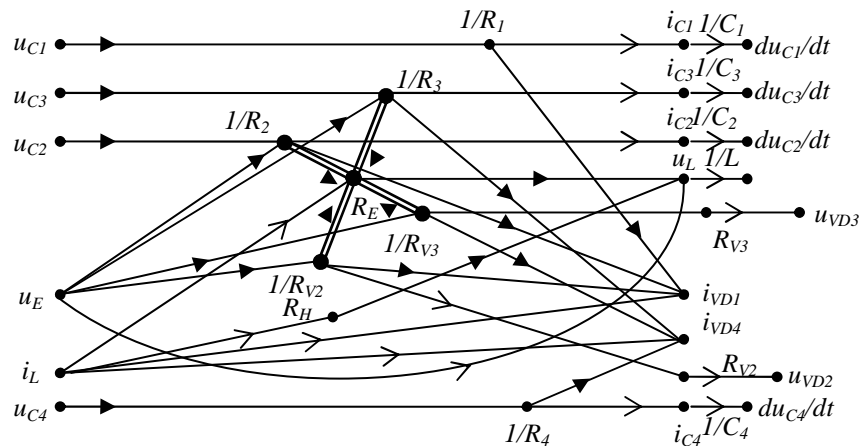


Рис. 3 – Топологическая структура уравнений состояния цепи на рис. 2 при открытых вентилях  $VD1$ ,  $VD4$

Положим, что  $e = E_m \sin \omega t$ ; где  $E_m$  – амплитуда;  $\omega$  – круговая частота;  $t$  – текущее время. Начальные условия (напряжения емкостей) на момент  $t = 0$  начала моделирования определим нулевыми:  $u_{C1}(0) = 0$ ;  $u_{C2}(0) = 0$ ;  $u_{C3}(0) = 0$ ;  $u_{C4}(0) = 0$ . При  $t = 0$  откроются клапаны  $VD1$  и  $VD4$ . На основе усовершенствованного топологического метода [9] сформируем показанную на рис. 3 топологическую структуру СДУ состояния для интервала проводимости клапанов  $VD1$  и  $VD4$ . Подобной СДУ описывается и состояние схемы для интервала проводимости клапанов  $VD2$ ,  $VD3$ . Слева на рис. 3 показаны узлы-источники (напряжения емкостей, напряжение источника питания, ток индуктивности), справа – узлы-

стоки (первые производные по времени напряжений емкостей и тока индуктивности и другие контролируемые параметры схемы). Дуга с открытой стрелкой имеет передачу плюс единица; закрытая – минус единица. Сдвоенными линиями показаны собственные контуры схемы и система их касания.

Для краткости изложения вместо СДУ приводятся их топологические структуры. Определение значений коэффициентов СДУ посредством формулы Мэзона [9] поясним на примере коэффициента, отражающего влияние напряжения емкости  $u_{C2}$  на производную по времени напряжения емкости  $du_{C2}/dt$ . Общий знаменатель  $\Delta_{14}$  всех коэффициентов передачи вычисляется согласно формуле Мэзона по выражению

$$\Delta_{14} = 1 + R_E \left[ (R_2)^{-1} + (R_3)^{-1} + (R_{V2})^{-1} + (R_{V3})^{-1} \right]. \quad (1)$$

От узла-источника  $u_{C2}$  в узел-сток  $du_{C2}/dt$  (рис. 3) имеем один путь с передачей  $(-1)(R_2)^{-1}(C_2)^{-1}$ . Минор этого пути  $\Delta_{u_{C2}, \dot{u}_{C2}}$  равен выражению (1), в котором приравнены нулю передачи контуров, касающихся указанного пути:

$$\Delta_{u_{C2}, \dot{u}_{C2}} = 1 + R_E \left[ (R_3)^{-1} + (R_{V2})^{-1} + (R_{V3})^{-1} \right].$$

В итоге коэффициент передачи от узла  $u_{C2}$  в узел  $du_{C2}/dt$  имеет вид:

$$\frac{\dot{u}_{C2}}{u_{C2}} = - \frac{\Delta_{u_{C2}, \dot{u}_{C2}}}{R_2 C_2 \Delta_{14}}$$

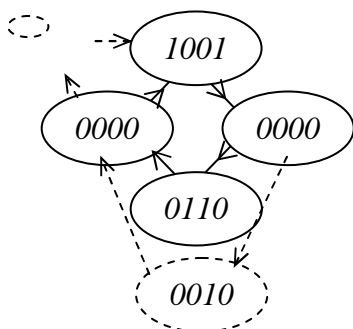


Рис. 4 – Граф переключения вентилей:  
— в исправной схеме;  
--- при снижении емкости одного

Для исправной схемы порядок изменения состояния проводимости вентилей исправной схемы соответствует графу на рис. 4 сплошной линией. Состояние 1001 соответствует открытым вентилям VD1, VD4; состояние 0000 – всем закрытым вентилям; состояние 0110 – открытым вентилям VD2, VD3. Топологическая структура уравнений состояния цепи на интервале 0000 полученная на основе рекомендаций [9] показана на рис. 5.

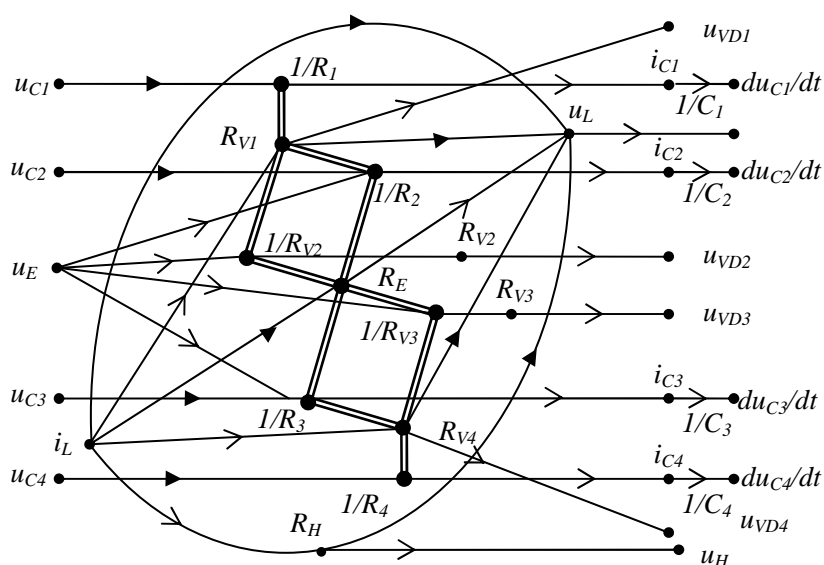


Рис. 5 – Топологическая структура уравнений состояния цепи на рис. 2 для закрытого состояния всех вентилей

Результаты численного моделирования процессов в схеме с исправными цепями показаны на рис. 6 а, в схеме с десятикратным снижением величины емкости  $C_1$  – на рис. 6 б. Снижение величины емкости  $C_1$  привело к изменению порядка переключения вентилей, что отражено штриховыми линиями на рис. 4. В таблице 1 приведены амплитуды спектральных составляющих выходного напряжения исправной схемы и для указанного вида неисправности.

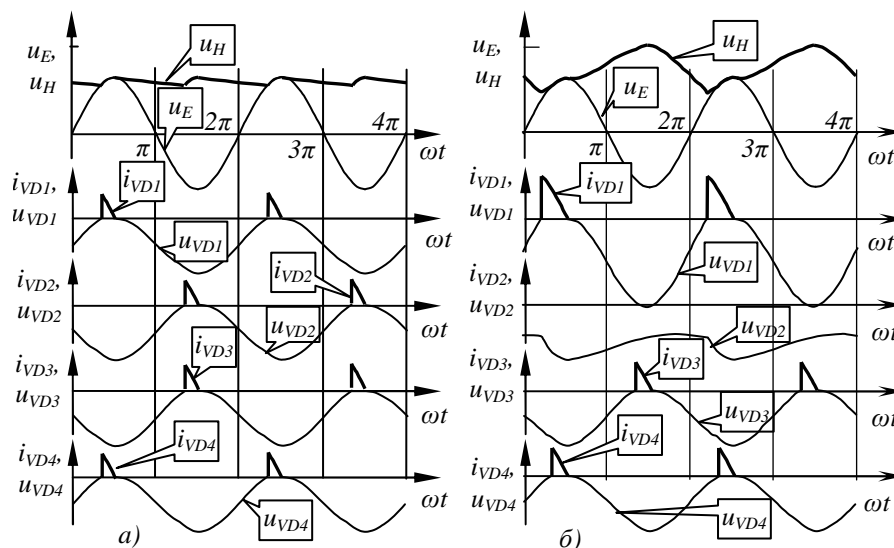


Рис. 6 – Токи и напряжения в силовой части при величине  $R_H = 1$  МОм для исправной схемы (а); при снижении десятикратном снижении величины емкости  $C_1$  (б).

Из сравнительного анализа мгновенных процессов на рис. 6, а, б и таблицы 1 очевидно, что снижение величины емкости одной из RC-цепей привело к возрастанию постоянной составляющей выходного напряжения выше величины амплитуды напряжения питания. В выходном напряжении неисправной схемы появилась гармоническая составляющая на частоте, равной частоте питающей сети. Перечисленные явления, как известно, не присущи мостовым однофазным схемам выпрямления с исправными вентилями. Указанные изменения спектрального состава выходного напряжения проявляются только при больших  $R_H$  и могут быть использованы в качестве диагностических признаков для контроля ТС снабберов. Для локализации отказавшей снабберной цепи достаточно провести измерения амплитуды обратных напряжений вентилей: как следует из рис. 6, б вентиль с дефективной RC-цепью имеет повышенную относительно других вентилей амплитуду обратного напряжения.

**Таблица 1.** Амплитуды спектральных составляющих выходного напряжения для исправной и неисправной силовых частей

Номер гармоники	0	1	2	3	4	5	6	7
Испр	11,942	0	0,611	0	0,273	0	0,151	0
Неиспр	15,021	4,398	1,179	0,341	0,385	0,087	0,125	0,018

## Выводы.

1. Предложена структура математической модели силовой части вентильного преобразователя, учитывающая наличие снабберов и позволяющая

определять диагностические признаки для различных ТС снабберных цепей.

2. Необходимым условием для контроля и диагностики ТС снабберов является отключение выходной емкости фильтра и обеспечение близкого к холостому ходу режима работы СЧ.

3. Диагностическими признаками для контроля ТС снабберов служат повышение постоянной составляющей выходного напряжения сверх амплитудного значения напряжения питания и наличие в выходном напряжении гармоники с сетевой частотой.

4. Диагностическим признаком для локализации дефективной RC-цепи является повышенная амплитуда обратного напряжения вентиля с дефективным снаббером.

#### Литература:

1. Техническая диагностика вентиляльных преобразователей./ В.В. Маркин, В.Н. Миронов, С.Г. Обухов.- М.: Энергоатомиздат. 1985. -152 с.
2. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. – М.: Издательский дом "Додэка-XXI", 2001. – 384 с.
3. Колпаков А. М. Устранение защелкивания в драйверах фирмы International Rectifier.// Chip news Украина. Инженерная микроэлектроника. 2002. №1, с. 56-58.
4. А. Колпаков. IGBT: инструкция об эксплуатации или об уважительном отношении к силовой электронике. // Силовая электроника. №1, 2007 г. – [http://www.power-e.ru/2007\\_01\\_17.php](http://www.power-e.ru/2007_01_17.php).
5. Остриров В. Разработка серии силовых электронных преобразователей для регулируемых электроприводов не современной электронной базе. [http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/02\\_08/stat\\_64.htm](http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/02_08/stat_64.htm)
6. Чибиркин В.В., Ковтун В.И., Мартыненко В.А. Новые разработки быстровосстанавливающихся диодов в ОАО "Электровыпрямитель" и их конструкторско-технологическое обеспечение. // Электротехника. 1998. №7. с. 38-46.
7. Куличков В.А. Импульсные блоки питания для IBM PC. 2-е изд., стер. – М.: ДМК Пресс, 2002. – 120 с.
8. Давыдов П.С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем. – М.: Радио и связь, 1988. – 256 с.
9. Шимук Д.С. Методика выявления информативных параметров технического состояния статических преобразователей.// Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. Вип. 2(6). – Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 1999. С. 145 – 149.

## ВИЗНАЧЕННЯ ДІАГНОСТИЧНИХ ОЗНАК ВІДМОВ СНАББЕРНИХ ЛАНЦЮГІВ

Р. Д. Шимук, Д. С. Шимук

*Розглядається зміст математичної моделі силової частини вентиляного перетворювача, що дозволяє визначити діагностичні ознаки відмов снабберних кіл силових вентилів*

## DEFINITION OF DIAGNOSTIC ATTRIBUTES OF FAILURES OF SNUBBER CIRCUITS

R. D. Shimuk, D. S. Shimuk

*The contents of mathematical model of a power part of the converter allowing to define diagnostic attributes of failures of snubbers circuits of power gates is considered.*